

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN



TRABAJO FIN DE GRADO

PROCESADO DE SEÑAL EFICIENTE PARA SISTEMAS MIMO  
MASIVOS

**Autor:** Celia Maroto Tapia

**Tutor:** Matilde P. Sánchez Fernández

8 Julio 2016



TÍTULO: *PROCESADO DE SEÑAL EFICIENTE PARA SISTEMAS MIMO MASIVOS*

AUTOR: *CELIA MAROTO TAPIA*

TUTOR: *MATILDE PILAR SÁNCHEZ FERNÁNDEZ*

La defensa del presente Trabajo Fin de Grado se realizó el día 8 de Julio del 2016 siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: Eva Rajo Iglesias

SECRETARIO: Luis Alfonso Entrena Arrontes

VOCAL: Maria Carmen Fernández Panadero

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

**Presidente**

**Secretario**

**Vocal**



# Agradecimientos

En primer lugar a mis padres por darme siempre la oportunidad de poder estudiar y dedicarme a lo que me gusta sin pega alguna, por apoyarme incondicionalmente en todas mis decisiones y sobretodo en los momentos más difíciles y de mayor estrés.

A mis amigos, tanto fuera como dentro de la universidad, puesto que sin ellos muchos momentos hubiesen sido aún más duros. Además de hacer de estos 4 años de carrera unos años muy bonitos.

A mi tutora Mati por darme la oportunidad de hacer el Trabajo Fin de Grado a distancia con ella dado que me encontraba todo el año en Finlandia y por su ayuda y apoyo durante la realización de este trabajo.



# Índice de acrónimos

1G: Primera Generación

2G: Segunda Generación

3D MIMO: MIMO tridimensional

3G: Tercera Generación

4G: Cuarta Generación

5G: Quinta Generación

AMPS: Advanced Mobile Phone System

BS: Base Station

CDIT-CDIR: Channel Distribution Information Tansmitter-Receiver

CDMA: Code Division Multiple Access

CRM: Combinación de Relación Máxima

CSI: Channel State Information

CSIT-CSIR: Perfect Channel State Information

CBSMs: Correlation-Based Stochastic Models

FDD: Frequency-division Multiplexing

GBSMs: Geometry-Based Stochastic Models

GSM: Global System for Mobile communications

IO ó IoT: Internet de los Objetos

LTE: Long Term Evolution

MIMO: Multiple-Input and Multiple-Output

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

PAS: Power Angular Spread

---

SCMA: Sparce Code Multiple Access

SISO: Simple Input Simple Output

SNR: Signal to Noise Ratio

$T_c$ : Coherence Time

TDD: Time-division Multiplexing

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System



# Índice de figuras

2.1. Comparación de FDD y TDD. . . . .	19
2.2. OFDMA. . . . .	20
3.1. MIMO. . . . .	23
3.2. SISO. . . . .	25
3.3. SIMO. . . . .	26
3.4. MISO. . . . .	26
3.5. MIMO masivo. . . . .	27
4.1. Representación del canal de comunicación. . . . .	33
5.1. Estudio de la ortogonalidad en función del número total de usuarios y antenas transmisoras . . . . .	38
5.2. Estudio de la ortogonalidad en función del número total de antenas transmisoras y receptoras . . . . .	39
5.3. Estudio de la ortogonalidad en función del número total de usuarios y de antenas receptoras . . . . .	40
5.4. Estudio de la capacidad en función del número de antenas receptoras	41
5.5. Estudio de la capacidad en función del número de antenas transmisoras	42
5.6. Estudio de la capacidad en función del número total de usuarios . . .	43



# Índice general

<b>1.. Introduction</b>	<b>13</b>
1.1. Project structure . . . . .	15
<b>2.. Estado del arte</b>	<b>17</b>
2.1. Primera Generación . . . . .	17
2.2. Segunda Generación . . . . .	18
2.3. Tercera Generación . . . . .	19
2.4. Cuarta Generación . . . . .	20
2.5. Quinta Generación . . . . .	21
<b>3.. MIMO</b>	<b>23</b>
3.1. Subformatos de MIMO . . . . .	25
3.1.1. SISO . . . . .	25
3.1.2. SIMO, MISO . . . . .	25
3.2. Sistemas MIMO masivo . . . . .	27
3.3. Modelo de canal . . . . .	28
<b>4.. Método de investigación</b>	<b>31</b>
4.1. Ortogonalidad . . . . .	31
4.1.1. Defecto de ortogonalidad . . . . .	32
4.2. Capacidad . . . . .	33
4.2.1. Capacidad para sistemas CSI . . . . .	35
4.2.2. Capacidad para sistemas no CSI . . . . .	36

<b>5.. Resultados</b>	<b>37</b>
5.1. Estudio de la ortogonalidad . . . . .	38
5.2. Estudio de la capacidad . . . . .	41
5.3. Conclusiones de los resultados . . . . .	43
<b>6.. Conclusions</b>	<b>45</b>
<b>APPENDIX</b>	<b>50</b>
<b>A..Extended abstract</b>	<b>51</b>
A.1. Introduction . . . . .	51
A.2. Methodology . . . . .	54
A.2.1. Channel modeling . . . . .	54
A.2.2. Orthogonality . . . . .	55
A.2.3. Capacity . . . . .	56
A.3. Results . . . . .	57
A.3.1. Orthogonality defect . . . . .	58
A.3.2. Capacity . . . . .	60
A.4. Conclusions . . . . .	62
<b>B..Entorno socio-económico, planificación y presupuesto</b>	<b>65</b>
B.1. Entorno socio-económico . . . . .	65
B.2. Planificación . . . . .	66
B.3. Presupuesto . . . . .	67
<b>Referencias</b>	<b>68</b>

# 1 Introduction

Nowadays Internet is not used only for the communication person-to-person, it is driven to connect houses, cars, watches and any other gadget. To make this possible we need a new generation, 5G, in order to cover Internet of Things (IoT), smartcities or even smart cars.

5G is a technology that has many advantages over its predecessors, it has 10 Gbps of speed and the main characteristic that makes 5G better than the other ones is that its latency<sup>1</sup> is close to zero. What is expected from 5G is the coverage of this requirements: high data rates per user, high coverage area, large capacity, ability to cope with high mobility conditions.

The capacity of the cellular systems is limited by the interference and increasing the capacity by increasing the transmitting power is not a good idea because it will rise the costs. Then we have to face this problems:

- The electromagnetic spectrum is an expensive and scarce resource.
- Having a cell size smaller than 300 meters is not recommendable.

In order to have a better spectral efficiency it is proposed to use multiples antennas both transmitting and receiving allowing high speed increasing neither the transmitted power nor the bandwidth. Recent investigations of the communication theory field have demonstrated that the capacity of the channel can be incremented if the multipath is rich enough and if it is used in a proper way in both transmitter and receiver. Thus Multiple input Multiple Output (MIMO) is used to achieve those advantages, the multipath propagation improves the spatial diversity and it allows the multiplexing of different channels of information.

---

<sup>1</sup>Latency is the time between the sending and the receiving of a packet, independently of the bandwidth.

---

On the other hand the main disadvantage is that using several antennas receiving and transmitting implies a limitation to the system due to the compactness of the devices. Further more, the larger the number of antennas in the system is, the harder the processing of the signal is.

This project is based on the study of the massive MIMO channel properties, in particular, we have been studying the orthogonality and the capacity of the channel in order to have a better performance when we want to decode the message received.

The main reason why we want to study the performance of the orthogonality is because if we are facing an orthogonal channel we get an easier decodification of the receiving signal due to the reduction of the signal processing complexity. In order to achieve that study, we have used the algebraic properties of the orthogonality defect of the channel matrix, this orthogonality defect is based on the properties of the norm of a matrix. As we can check along the project, the orthogonality defect is getting better when the number of users is larger. On the other hand, if the number of antennas in the system is bigger the orthogonality defect is worse, this is because the more antennas the system has the more interaction between signals is obtained.

The other study performed is the capacity as a result of its evolution with MIMO. The measurement of the capacity system can vary depending on the knowledge of the channel state we have. If we do not know the channel state we can set an stochastic approximation of it, whereas if we know it, we can get a better performance of the capacity as long as the pilot used for knowing the channel state is not infected.

According to the capacity study, we have been measuring it once the received signal is decoded, in other words, when the filter of the receiver has been applied, and without any knowledge about the channel state. As we will follow in this project, the capacity is directly proportional to the number of antennas, as well as to the number of users.

### 1.1 Project structure

At the beginning of this project it will be explained the state of art in which all the telecommunication generations will be exposed, from the first generation to the fifth generation.

In the next chapter MIMO will be analysed, because MIMO is one of the technologies that will cover the necessities of the 5G. In this part the sub-formats of MIMO (Single Input Multiple Output (SIMO), Multiple Input Single Output (MISO) and Single Input Multiple Output (SIMO)) will be shown. Moreover in this chapter the channel modeling will be explained as well as its corresponding algebra.

In the next chapter the orthogonality and the capacity of the MIMO channel will be described. This chapter is the most important one because it is the case study.

In the last phase of this project the results of the simulations will be shown. Both orthogonality and capacity will be performed depending on the number of users and transmitting and receiving antennas. Although in the case of the capacity simulations, they will be done depending on the Signal to Noise Ratio (SNR) of the system as well.





## 2 Estado del arte

### 2.1 Primera Generación

La Primera Generación (1G) utiliza la tecnología sistema telefónico móvil avanzado, en inglés Advanced Mobile Phone System (AMPS) y ofrece una velocidad de 2 kbps.

AMPS es una tecnología que se basa en la división del territorio en pequeños sectores conocidos como celdas. Una celda se abastece con una red de radiofrecuencia basada en un transceptor, por lo que la misma frecuencia puede ser reusada varias veces teniendo como resultado un gran uso del espectro y, por lo tanto, un incremento de la capacidad del sistema [1]. Cada celda tiene una frecuencia distinta a su celda adyacente para evitar interferencias. Si la comunicación se quiere hacer entre celdas adyacentes, los usuarios de dichas celdas se tendrán que conectar a una central de conmutación móvil, en inglés Mobile Switching Center [2].

En comparación con las tecnologías móviles anteriores, las cuales necesitaban una conexión con cable, 1G proporcionó por primera vez una verdadera movilidad inalámbrica permitiendo el uso de teléfonos móviles fuera de casa o incluso en coches [3].

La principal desventaja de 1G frente a las posteriores tecnologías es que utiliza una tecnología analógica, al contrario de las posteriores que utilizan transmisión digital. La transmisión analógica es menos efectiva en cuanto al envío de información, además las señales analógicas son más propensas a sufrir interferencias [4]. A su vez, el hardware necesario tanto en el receptor como en el emisor tiene que ser diseñado perfectamente en función de la transmisión a realizar, esto significa que si se quiere trabajar en un nuevo sistema con una nueva señal es necesario cambiar completamente el transmisor y el receptor [5]

## 2.2 Segunda Generación

La Segunda Generación (2G) se basa en la tecnología sistema global para las comunicaciones móviles, del inglés Global System for Mobile communications (GSM) y proporciona una velocidad de 64 kbps con 200 KHz de ancho de banda.

En GSM [6] cuando se quiere establecer una llamada, ésta se conecta con la celda más cercana al usuario. Hay cinco tipos distintos de celdas y la cobertura de cada celda depende del tipo de implementación requerida.

- **Macro**. Son aquellas celdas donde la antena de la estación base, del inglés Base Station (BS), está instalada a una altura semejante a la de una azotea.
- **Micro**. En estas celdas la altura de la antena no es superior a la del tejado de un edificio. Son normalmente empleadas en zonas urbanas.
- **Pico**. Son pequeñas celdas cuya cobertura es aproximadamente un radio igual a unas docenas de metros.
- **Femto**. Estas celdas son usadas en un espacio pequeño como en casas y oficinas.
- **"Paraguas"**. Dichas celdas son requeridas para cubrir las zonas sin cobertura, "huecos" entre celdas vecinas.

Los principales beneficios de 2G frente a 1G es que las conversaciones telefónicas son completamente encriptadas de manera digital. 2G tiene una mayor eficiencia de espectro, lo que permite un mayor número de usuarios. 2G activando distintas redes de telefonía móvil introduce servicios de datos móviles, como el envío de mensajes de texto o incluso multimedia [7]

Una de las principales desventajas de la tecnología 2G en alta frecuencia es que, en áreas con pocos habitantes, si la señal es débil puede que no llegue a la BS [8].

### 2.3 Tercera Generación

La Tercera Generación (3G) utiliza la tecnología sistema universal de telecomunicaciones móviles, del inglés Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Tiene una velocidad entre 144 Kbps y 2 Mbps, con un ancho de banda entre 900 y 1800 MHz.

En comparación con GSM, UMTS proporciona un nuevo beneficio, UMTS permite la negociación de las propiedades de la conexión. Dichas propiedades pueden incluir parámetros como el rendimiento, el retardo en la transferencia de datos o la tasa de error [9]

UMTS es una tecnología que ofrece:

- Interoperabilidad entre distintas tecnologías de telecomunicación.
- Una velocidad superior a 2 Mbps (teórico).
- Conexión basada en circuitos y basada en paquetes simultáneamente.

El instituto europeo de estándares de telecomunicaciones seleccionó la tecnología de acceso múltiple por división de código de banda ancha, del inglés Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), como la tecnología base para 3G. WCDMA separa el dominio de la frecuencia de dos formas distintas, división por multiplexación temporal, del inglés Time-Division Duplexing (TDD) y división por multiplexación frecuencias, del inglés Frequency-Division multiplexing (FDD), como podemos comprobar en la figura 2.1

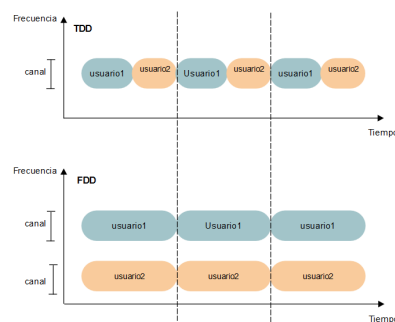


Figura 2.1: Comparación de FDD y TDD.

## 2.4 Cuarta Generación

La Cuarta Generación (4G) se basa en la tecnología de evolución a largo plazo, del inglés Long Term Evolution (LTE). Su velocidad es entre 20 y 40 Mbps, además opera con un ancho de banda de 800 a 1500 MHz y entre 1800 y 2600 MHz.

LTE ofrece un aún mejor rendimiento con un mayor ancho de banda, esto conlleva a una mayor capacidad y una reducción de coste. LTE utiliza acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (figura 2.2), del inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA), el cual es mejor que el anterior WDCMA ya que logra altos datos de pico [10].

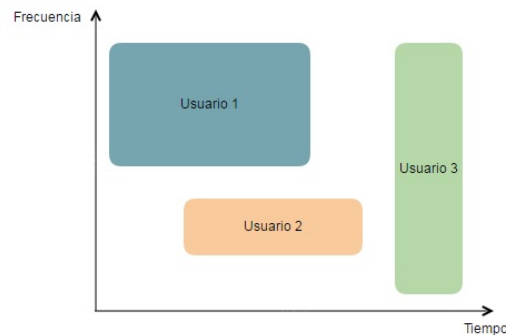


Figura 2.2: OFDMA.

La ventaja más notoria de 4G respecto a 3G es el gran aumento de la velocidad que 4G ofrece. Pero la velocidad no es la única mejora sino que la señal de 4G es más fiable que la de las generaciones anteriores [11]. Esta mejora es muy importante ya que hoy en día, y desde hace unos años atrás, Internet se ha convertido en una herramienta diaria indispensable. Otra ventaja más de 4G respecto a sus antecesores es la cobertura, en contraposición con el WiFi y otras tecnologías inalámbricas, la tecnología 4G puede hacer que cualquier dispositivo sea un punto de acceso cuya cobertura puede llegar a superar los 45000 metros [11].

### 2.5 Quinta Generación

El crecimiento exponencial del número de dispositivos móviles y por tanto de consumo de datos, conlleva a la búsqueda de nuevas tecnologías y enfoques para poder abarcar la gran demanda que los usuarios requieren. La siguiente generación de comunicaciones móviles es la llamada Quinta generación (5G) cuya tecnología deberá cubrir un amplio desarrollo de la alta velocidad y servicios de baja latencia. Es probable que 5G tenga que enfrentarse a velocidades de 100 Mbps así como de velocidades de pico de hasta los 10 Gbps [12].

Podríamos decir que hay muchos candidatos como futura tecnología para 5G [13] como :

- **OFDMA**. Como se mencionó anteriormente, es utilizada en 4G y podría utilizarse en 5G.
- **Acceso múltiple con escucha de portadora, del inglés Sparse Code Multiple Access (SCMA)**. Es una mezcla entre OFDMA y acceso por multiplexación de división de código, del inglés Code Division Multiple Access (CDMA). En SCMA, la técnica de OFDMA en la que se aplica una subportadora a cada usuario se ha desarrollado para utilizar lo que se denomina como código de portadora y de esta manera un gran conjunto de usuarios se pueden añadir al medio mientras que los niveles de eficiencia espectral se mantienen.
- **Múltiple acceso no ortogonal, del inglés Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)**. NOMA consiste en tener diferentes señales con distintos niveles de potencias, entonces es posible el aislamiento de la parte más fuerte de la señal en el receptor y por tanto cancelarlo para quedarnos con la parte más baja de la señal.

Otro reto con el que 5G se tiene que enfrentar es el dramático incremento del número de servicios que tendrán que ser soportados. Mientras que las tecnologías anteriores fueron impulsadas por el uso de Internet móvil, como la comunicación persona-persona, lo que se espera de 5G es que controle billones de nuevos dispositivos con distintas finalidades como el control remoto, la telemetría así como el control de aplicaciones que conllevan un gran número de interacciones máquina-máquina y persona-máquina como parte de Internet de los Objetos (IO).

5G desafortunadamente será poco uniforme en su área de servicio. Diferentes tecnologías, espectro y arquitecturas tendrán que ser implementadas teniendo en cuenta los requisitos técnicos, comerciales y locales, y la evolución de los equipos anteriores [14].

En cuanto al espectro, la idea principal es tener varias bandas de frecuencia entre los 6 GHz y los 100 GHz, como podemos comprobar dichas frecuencias son muy superiores a las anteriores usadas en telefonía móvil (no mayor de los 3 GHz). Dicha disposición de frecuencias es debido a que así cada canal de 1 GHz pueda llegar a tener velocidades de pico de más de 10 Gbps [15].

MIMO es uno de los métodos para incrementar la velocidad de transmisión, aunque a que debido al número de antenas enviando al mismo tiempo la interferencia entre señales podría ser un gran problema a resolver. Estudios de la Universidad de Bristol, Inglaterra, junto con la Universidad de Lund, Suecia, describen cómo se puede soportar la tecnología 5G mediante sistemas MIMO mediante el uso de 128 antenas MIMO se llegan a conseguir unos valores de eficiencia espectral muy altos, los cuales podrían ser bastante significativos en cuanto a 5G se refiere, MIMO puede llegar a incrementar severamente la eficiencia espectral comparada con la actual tecnología 4G [16] [17].

### 3 MIMO

A la hora de satisfacer todas las necesidades anteriormente mencionadas MIMO se enfrenta a diversos problemas como, por ejemplo, a la hora de aumentar la capacidad del sistema. La capacidad de los sistemas inalámbricos están limitados debido a la interferencia y dicha capacidad no es recomendable aumentarla aumentando la potencia transmitida, debido al coste que ésto produciría. En cuanto al tamaño de las celdas, éste no puede ser inferior a 300 metros o de lo contrario sería no factible. La eficiencia espectral se puede aumentar con el uso de múltiples antenas en emisión y recepción (MIMO), permitiendo altas velocidades de transmisión sin que la potencia transmitida y la asignación de ancho de banda sean aumentadas.

Anteriormente la propagación multitrayecto se veía como un inconveniente en cuanto al desvanecimiento de canal. Investigaciones recientes han demostrado que la propagación multitrayecto tiene notorias ventajas respecto a la capacidad siempre y cuando el canal esté insuficientemente incorrelado y sea usado apropiadamente mediante múltiples antenas, tanto en el emisor como en el receptor. MIMO es una tecnología usada en telecomunicaciones en la cual múltiples antenas son usadas tanto en el emisor como en el receptor, como podemos ver en la figura 3.1.

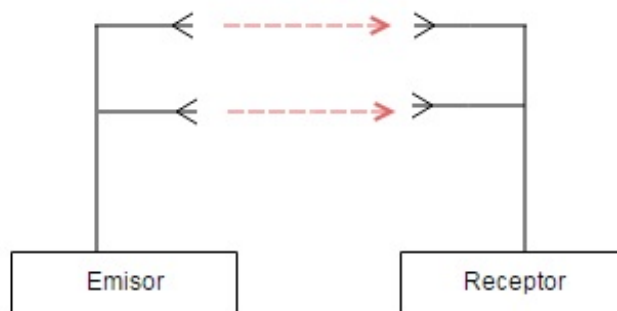


Figura 3.1: MIMO.

---

MIMO permite implementar diversidad de tiempo, de frecuencia, espacial y de usuarios [18].

- **Diversidad temporal.** Múltiples copias de la información son enviadas en diferentes ranuras de tiempo. Dichas ranuras de tiempo son designadas de tal manera que el espacio temporal entre las réplicas es mayor que el tiempo de coherencia del canal, del inglés Coherence Time ( $T_c$ ). Esta condición puede crear canales incorrelados sobre esas ranuras de tiempo. Usar diferente codificación es una técnica usada a la hora de separar dichas réplicas.
- **Diversidad espacial.** La misma información es enviada por distintos canales de comunicación para combatir las pérdidas. Cuando la misma información es enviada desde distintos canales, éstas sufren distintas atenuaciones dependiendo del canal, esto garantiza que al menos una de las copias sufra menos interferencias que el resto y por tanto la probabilidad de recibir la información enviada aumenta.
- **Multiplexación espacial. OFDM.** En multiplexación espacial si la dispersión ambiental es lo suficientemente rica, diferentes subcanales independientes pueden ser alocados en el mismo ancho de banda de frecuencia. Por tanto, la multiplexación no tiene un coste adicional en cuanto a banda de frecuencia o potencia.
- **Diversidad de usuarios.** La calidad del canal para cada usuario es estudiada por un organizador para seleccionar tanto el número de usuarios, la codificación y la modulación de tal manera que el envío de información sea óptimo.



## 3.1 Subformatos de MIMO

### 3.1.1 SISO

SISO proviene del inglés Single Input Single Output que significa única entrada única salida, como se puede observar en la figura 3.2. SISO es la forma más simple de comunicación de entre los cuatro distintos subformatos de MIMO.

La ventaja del sistema SISO es su simplicidad. Es un sistema que no requiere ningún tipo de procesamiento en cuanto a diversidad se refiere. El rendimiento del sistema depende del ancho de banda del canal y de la relación señal a ruido, del inglés Signal to Noise Ratio (SNR).

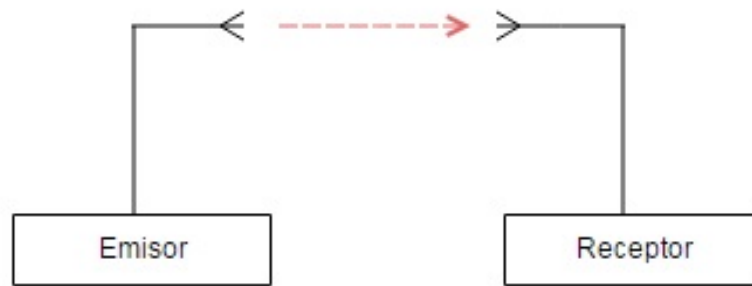


Figura 3.2: SISO.

### 3.1.2 SIMO, MISO

SIMO, del inglés Single Input Multiple Output, significa entrada única salida múltiple, como podemos comprobar en la figura 3.3. SIMO es una versión de MIMO donde el emisor tiene una sola antena y el receptor múltiples antenas. Este tipo de escenarios es normalmente utilizado para activar un sistema receptor el cual recibe una señal desde múltiples e independientes fuentes para combatir los efectos de atenuación [19]. SIMO también ha sido usado durante muchos años para recibir y enviar señales para combatir los efectos de interferencia de la ionosfera.

MISO, del inglés Multiple Input Single Output, múltiple entrada salida simple en español como se puede ver en la figura 3.4. En este caso se envía la misma señal en todas las antenas emisoras por lo que el receptor es capaz de recibir la señal con una calidad óptima. La ventaja del uso de MISO es que múltiples antenas y por lo tanto redundante codificación/decodificación es enviado desde el receptor hasta el emisor. Por ejemplo, en el caso de un usuario móvil, MISO puede ofrecer una clara ventaja en cuanto a la reducción del nivel de procesamiento requerido a la hora de recibir código redundante. Esto tiene un alto impacto en cuanto al tamaño, coste y vida de las baterías.

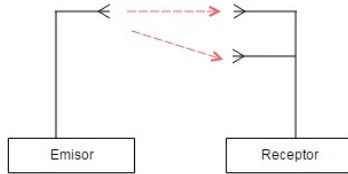


Figura 3.3: SIMO.

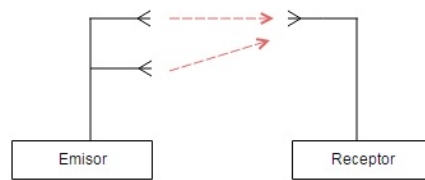


Figura 3.4: MISO.

## 3.2 Sistemas MIMO masivo

MIMO masivo es un punto de inflexión en cuanto al uso de un gran número de antenas que están operando coherentemente y adaptadamente. El uso de más antenas ayuda a la focalización, tanto del envío como de la recepción, de la energía de la señal en regiones del espacio aún más pequeñas. Esto conlleva a grandes mejoras en cuanto al rendimiento y la eficiencia de la energía, en concreto cuando se combina simultáneamente el envío de severos usuarios. MIMO masivo fue, originalmente, diseñado para TDD aunque con el tiempo se vio posible su utilización en FDD. Otro beneficio de MIMO masivo es la posibilidad del uso de componentes cuyo consumo de energía es bajo, por consiguiente se consigue una reducción de latencia y por tanto una simplificación de control al acceso medio, del inglés Media Access Control (MAC) así como la robustez de la interferencia.

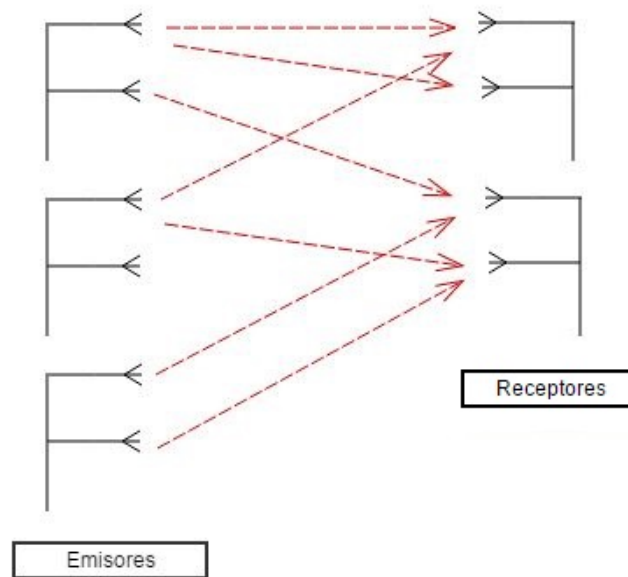


Figura 3.5: MIMO masivo.

Una de las partes más importantes a la hora de decodificar el mensaje enviado es conocer el estado del canal, dicho estado puede conocerse, principalmente, de dos maneras distintas. Una de las maneras es mediante su simulación por procesos estocásticos, esto es que no se tiene un conocimiento del canal pero su estado puede ser representado mediante modelos estocásticos. La otra forma de determinar el estado del canal es mediante el envío de pilotos, éstos se basan en la respuesta de la estación base a cada uno de los terminales. La estación base envía el piloto dependiendo de cómo los terminales estimaron el estado del canal.

La problemática es que los pilotos no pueden ser utilizados en entornos de alta movilidad por dos razones:

- Para un buen uso de pilotos en el enlace descendente, éstos tienen que ser mutuamente ortogonales entre las antenas. Esto significa que el número de pilotos necesarios para la estimación del canal es directamente proporcional con el número de antenas del sistema.
- El número de estimaciones de canal que cada terminal tiene que realizar también es proporcional al número de antenas en la estación base.

### 3.3 Modelo de canal

Hay dos formas distintas de modelar el canal, una es mediante modelos estocásticos basados en la correlación, del inglés correlation-based stochastic models (CBSMs), y mediante modelos estocásticos basados en geometría, del inglés geometry-based stochastic models (GBSMs). Debido a que la complejidad de CBSMs es menor que GBSMs es la utilizada para calcular el estado teórico de los canales MIMO. Aunque la estimación del canal es complicado, teniendo en cuenta los efectos de onda esférica y que el canal es no estacionario, GBSMs ofrece un modelo de canal realista y es más preciso para sistemas MIMO masivo aunque con mayor complejidad de cálculo [20]. Este proyecto se basa en el modelado del canal según CBSMs.

El canal MIMO es descrito por la matriz  $\mathbf{H}$ , cuyos elementos  $h_{nm}$  definen las pérdidas del canal de la antena transmisora  $m$ , con la antena receptora  $n$  en la estación base, del inglés Base Station (BS). El número de antenas transmisoras y receptoras está reflejado por  $M$  y  $N$ , respectivamente. Asumiendo un canal de desvanecimiento

plano estacionario con correlación espacial,  $\mathbf{H}$  puede ser descrita como la ecuación (3.1), donde  $r'_n$  es la posición relativa de la antena  $n$  receptora y  $r_m$  la posición de la antena  $m$  transmisora. Las direcciones de las ondas transmitidas y recibidas se reflejan mediante los vectores  $[k_1, k_2, \dots, k_L]$  y  $[k'_1, k'_2, \dots, k'_L]$  respectivamente [6] [23].

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{jk'_1 r'_1} & e^{jk'_2 r'_1} & \dots & e^{jk'_L r'_1} \\ e^{jk'_1 r'_2} & e^{jk'_2 r'_2} & \dots & e^{jk'_L r'_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{jk'_1 r'_N} & e^{jk'_2 r'_N} & \dots & e^{jk'_L r'_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S(k'_1, k_1) & S(k'_1, k_2) & \dots & S(k'_1, k_L) \\ S(k'_2, k_1) & S(k'_2, k_2) & \dots & S(k'_2, k_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(k'_L, k_1) & S(k'_L, k_2) & \dots & S(k'_L, k_L) \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} e^{-jk_1 r_1} & e^{-jk_2 r_1} & \dots & e^{-jk_L r_1} \\ e^{-jk_1 r_2} & e^{-jk_2 r_2} & \dots & e^{-jk_L r_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jk_1 r_M} & e^{-jk_2 r_M} & \dots & e^{-jk_L r_M} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_N^\dagger \mathbf{S} \mathbf{B}_M \quad (3.1)$$

Donde  $\mathbf{B}_N^\dagger$  y  $\mathbf{B}_M$  son matrices rectangulares que dependen de la geometría de la antena transmisora y receptora, respectivamente, y  $\mathbf{S}$  es una matriz rectangular modelada según la dispersión angular.

Asumiendo que el canal es Gaussiano y que las dispersiones son independientes,  $\mathbf{S}$  es caracterizada por la unión de la potencia de la dispersión angular, del inglés Power Angular Spread (PAS) [24]. Por lo que  $\mathbf{S}$  puede definirse como la expresión (3.2)

$$\mathbf{S} = \Sigma^{\frac{1}{2}}_R \mathbf{G} \Sigma^{\frac{1}{2}}_T \quad (3.2)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (3.1) y (3.2), podemos expresar el canal como (3.3)

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^\dagger \Sigma^{\frac{1}{2}}_R \mathbf{G} \Sigma^{\frac{1}{2}}_T \mathbf{B}_M \quad (3.3)$$

Donde  $\Sigma^{\frac{1}{2}}_R$  y  $\Sigma^{\frac{1}{2}}_T$  son matrices diagonales cuya diagonal principal está modelada según el correspondiente PAS y  $\mathbf{G}$  es una matriz gaussiana compleja con valores aleatorios idénticamente independientes y varianza igual a 1.



## 4 Método de investigación

### 4.1 Ortogonalidad

El estudio de las propiedades del canal de este proyecto se basa en el canal ascendente. El primer objetivo es el estudio de la ortogonalidad del sistema debido a que si la matriz del canal,  $\mathbf{H}$ , es ortogonal se podrá utilizar el filtro adaptado en el receptor a la hora de decodificar el mensaje. Dicho mensaje una vez codificado y enviado, llega al receptor como se refleja en la ecuación (4.1), siendo  $\mathbf{n}$  ruido Gaussiano.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4.1)$$

Como se ha mencionado anteriormente, si la matriz  $\mathbf{H}$  es ortogonal se podrá utilizar un filtro adaptado para el procesamiento de la señal, siendo  $\mathbf{W}_{rx}$  el filtro adaptado en el receptor y en el transmisor. Por lo que a la hora de aplicar el filtro obtendríamos el mensaje tal y como lo refleja la ecuación (4.2).

$$\mathbf{W}_{rx}\mathbf{y} = \mathbf{W}_{rx}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{W}_{rx}\mathbf{n} \quad (4.2)$$

Si la matriz de canal  $\mathbf{H}$  es ortogonal se podrá decodificar el mensaje  $\mathbf{x}$  con un ruido residual, dado que en este caso  $\mathbf{W}_{rx}$  sería igual a  $\mathbf{H}'$  y tenemos que  $\mathbf{H}\mathbf{H}' = \mathbf{I}$  dando lugar a:

$$\mathbf{W}_{rx}\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{W}_{rx}\mathbf{n} \quad (4.3)$$

### 4.1.1 Defecto de ortogonalidad

Para medir la ortogonalidad de la matriz  $\mathbf{H}$  se utiliza el defecto de ortogonalidad, el cual mide la relatividad de la matriz  $\mathbf{H}$  con una matriz identidad. Para medir dicho defecto se han utilizado, principalmente, dos propiedades algebraicas:

- **Volumen de la matriz  $\mathbf{H}$ .** El volumen de una figura viene representado por el número de vectores de la matriz. El volumen de una matriz  $\mathbf{A}$  de dimensiones  $M \times N$  viene dado por la fórmula (4.4)

$$V(\mathbf{A}) = \sqrt{\det(\mathbf{A}^\dagger \mathbf{A})} \quad (4.4)$$

- **Norma vectorial.** La norma de un vector determina la magnitud de un vector bajo una consideración. Fijada una base ortonormal, la norma de un vector  $\mathbf{a}$ , de  $n$  componentes, viene dada por (4.5)

$$\|\mathbf{a}\| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (4.5)$$

El defecto utilizado en este proyecto para estimar la ortogonalidad del canal  $\mathbf{H}$  del sistema viene definido por la ecuación (4.6), siendo  $h_i$  la columna  $i$  de la matriz de canal  $\mathbf{H}$ .

$$d(\mathbf{H}) = \frac{\prod_{i=1}^n \|h_i\|}{\sqrt{\det(\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H})}} \quad (4.6)$$

Siendo  $d(\mathbf{H}) \geq 1$ . Cuando  $d(\mathbf{H}) = 1$  significa que la matriz  $\mathbf{H}$  es ortogonal.



## 4.2 Capacidad

La capacidad es otro factor estudiado en este proyecto. La capacidad en este caso se ha calculado una vez la señal recibida ha sido filtrada.

La capacidad de un canal es una medida con la cual podemos obtener la máxima cantidad de información que se puede enviar de forma fiable a través de un canal de telecomunicaciones. El cálculo de este parámetro se puede hallar basándose en la información mutua entre la entrada y la salida del modelo probabilístico del canal [21]. Como se puede comprobar en la figura 4.1 la capacidad puede ser definida como (4.7), siendo  $I(X;Y)$  la información mutua entre las dos señales y  $p_x$  la distribución marginal de la señal transmitida.

$$C = \sup_{p_x(x)} I(X;Y) \quad (4.7)$$

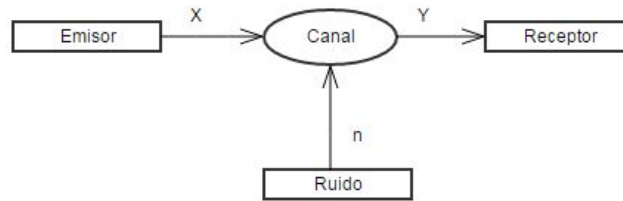


Figura 4.1: Representación del canal de comunicación.

El Teorema de Shannon, ecuación 4.8, nos da un valor máximo de la capacidad de un sistema como función de la potencia transmitida  $S$ , el ancho de banda disponible  $B$ , y la densidad espectral de potencia del ruido  $N$ .

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (4.8)$$

Esta fórmula expresa una cota superior con la que se pueden comparar el comportamiento de los sistemas reales ya que la velocidad de dichos sistemas de transmisión contienen ruido y no llegan a alcanzar dichas velocidades.

De la anterior expresión se puede concluir que:

- El ancho de banda  $B$  limita lo rápido que un símbolo puede ser enviado por el canal.
- El SNR limita cuánta información se puede codificar en cada símbolo. SNR es una función de la calidad de la señal en relación con el ruido del canal. En cuanto a la ausencia de ruido SNR tiene un valor tendente a infinito y por tanto una tasa de información infinita puede ser enviada en un sistema de pequeño ancho de banda.

Por lo tanto, el teorema de Shannon tiene dos implicaciones fundamentales:

- Obtiene velocidad segura de envío de cada símbolo, según los parámetros del canal.
- En el caso de que la velocidad sea fija, se puede reducir la potencia de la señal siempre y cuando el ancho de banda sea aumentado.

Cuando queremos analizar la capacidad de un sistema MIMO, tenemos que diferenciar varias situaciones dependiendo del conocimiento o no que tengamos del canal y de cómo varíe el canal durante la transmisión. Si se tiene conocimiento del estado del canal, del inglés Channel State Information (CSI), puede ser dividido en dos conjuntos:

- Conocimiento perfecto del canal en el transmisor y receptor, del inglés Perfect Channel State Information (CSIT-CSIR).
- Conocimiento estadístico del canal en el transmisor y receptor, del inglés Channel Distribution Information Transmitter-Receiver (CDIT-CDIR).

### 4.2.1 Capacidad para sistemas CSI

CSI se basa en el conocimiento perfecto del canal. Como se mencionó anteriormente, MIMO masivo se basa en el envío de pilotos para saber el estado de canal tanto en el transmisor como en el receptor.

El objetivo de los canales CSI es que la capacidad sea una gaussiana con media cero dado que así es más fácil descomponer su covarianza  $\Phi$  como la ecuación 4.9, donde  $\mathbf{V}$  contiene los autovectores y  $\mathbf{P}$  es una matriz diagonal que contiene los autovalores.

$$\Phi = \mathbf{V}\mathbf{P}\mathbf{V}^\dagger \quad (4.9)$$

Con la condición de que el canal es CSIT-CSIR,  $\Phi$  es función del canal  $\mathbf{H}$ . La capacidad es calculada mediante la creación de canales paralelos ortogonales. Teniendo en cuenta la fórmula anteriormente mencionada, la capacidad para un sistema CSI se define como (4.10)

$$C = E\left(\max_{\Phi; \text{Tr}(\Phi) \leq 1} \log_2 \left( \det(\mathbf{I} + \text{SNR}\mathbf{H}\Phi\mathbf{H}^\dagger) \right)\right) \quad (4.10)$$

En multiplexación espacial, una señal de alta velocidad es dividida en múltiples señales de baja velocidad y cada una de estas señales son transmitidas desde diferentes antenas bajo la misma frecuencia. Si las señales llegan al receptor con el suficiente diferencia espacial entre sí y el receptor tiene CSI, puede separar las señales en canales paralelos. Multiplexación espacial es una técnica muy importante a la hora de incrementar la capacidad del canal con valores altos de SNR, el máximo número de subseñales está limitado por el número de antenas en el transmisor y/o receptor.

### 4.2.2 Capacidad para sistemas no CSI

En esta situación, ni el transmisor ni el receptor tienen conocimiento sobre el estado del canal. Este proyecto se basa en el estudio de la capacidad bajo el supuesto de que no se tiene conocimiento previo sobre el estado del canal.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, para maximizar la capacidad bajo el peor caso, el cual implica que  $\Phi = \frac{1}{M}$ , obtenemos una capacidad igual a (4.11)

$$C = E \left( \log_2 \left( \det \left( I + \frac{SNR}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right) \right) \right) \quad (4.11)$$

Uno de los principales objetivos de este proyecto es el estudio de la capacidad una vez la señal ha sido filtrada. Teniendo en cuenta el filtro mencionado en la ecuación (4.3) y la capacidad reflejada en (4.11), obtenemos una capacidad representada por (4.12)

$$C = E \left( \log_2 \left( \det \left( \mathbf{I} + SNR \frac{\mathbf{W}_{rx} \mathbf{H} \mathbf{H}' \mathbf{W}_{rx}'}{\mathbf{W}_{rx} \mathbf{W}_{rx}'} \right) \right) \right) \quad (4.12)$$

## 5 Resultados

Este proyecto se ha centrado en el estudio de las características del canal MIMO masivo y así como en el estudio de la ortogonalidad y la capacidad de dicho canal con la finalidad de saber cómo se comportan estas características en función de un número de antenas transmisoras y receptoras además de número de usuarios.

En este apartado se muestran las simulaciones del canal MIMO masivo. Primero se muestran las gráficas correspondientes al estudio de la ortogonalidad seguido del estudio de la capacidad.

MIMO masivo se basa en el uso de un elevado número de usuarios y de antenas del sistema, tanto transmisoras como receptoras. El estudio se realiza en base a un sistema “uplink” o conexión de subida. En cuanto al receptor, es decir la BS, el número de antenas es definido por  $N$ . En cuanto al emisor, el número total de usuarios es definido por  $L$ ,  $m_i$  refleja el número de antenas del usuario  $i$  y el número total de antenas transmisoras  $M$  que está definido por:  $\sum_{i=1}^L m_i = M$ .

En cuanto a la colocación de las antenas en el espacio, la separación vertical y horizontal entre antenas es de  $\frac{\lambda}{2}$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda. La elevación de las antenas es de  $\frac{\pi}{2}$ . En lo que se refiere a la colocación de los usuarios, éstos se encuentran equiespaciados entre sí.

## 5.1 Estudio de la ortogonalidad

La simulación 5.1 se ha realizado con la finalidad de comprobar el comportamiento del defecto de ortogonalidad en función, principalmente, del número de usuarios transmisores. En este caso se ha fijado el número de antenas receptoras  $N$ , siendo un total de  $N = 100$  antenas. Para la primera iteración se ha fijado el número de antenas transmisoras  $M = 4$ , en cuanto al número de usuarios,  $L$ , este ha ido creciendo de 2 a 4 usuarios, es decir en el caso de tener, por ejemplo,  $M = 4$  y  $L = 2$  el número de antenas por usuario es  $m_1 = 2$  y  $m_2 = 2$ , así sucesivamente. En la segunda iteración se ha fijado el número de antenas emisoras  $M = 5$  y el número total de usuarios  $L$  varía de 2 a 5. En la tercera iteración  $M = 6$  y  $2 \leq L \leq 6$ . Respecto a la cuarta iteración  $M = 7$  y  $2 \leq L \leq 7$ .

Como se puede observar, a medida que el número de antenas transmisoras en cada usuario disminuye, el defecto de ortogonalidad mejora. Así como podemos ver que a medida que el número de usuarios aumenta el defecto de ortogonalidad aumenta, y por tanto empeora.

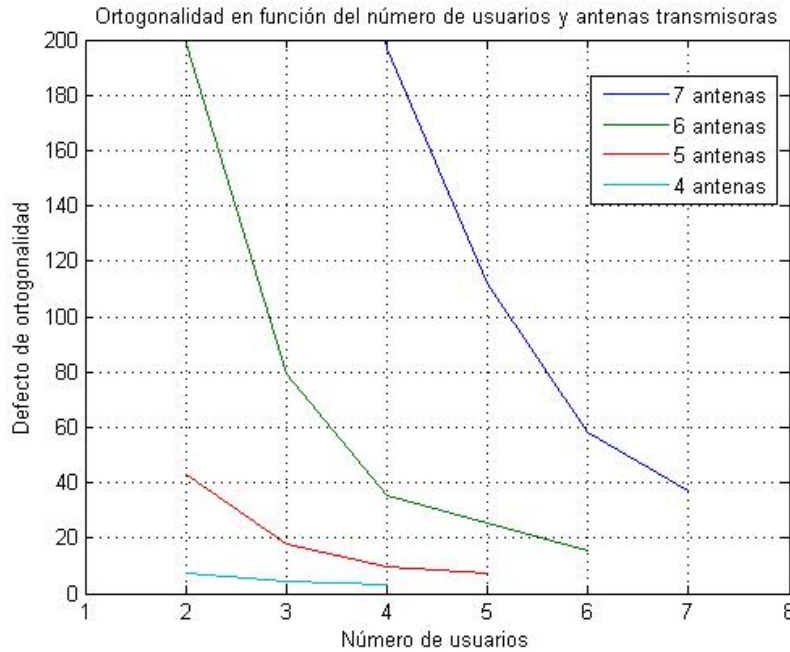


Figura 5.1: Estudio de la ortogonalidad en función del número total de usuarios y antenas transmisoras

A continuación en la figura 5.2 se muestra el defecto de ortogonalidad según el número de antenas transmisoras por usuario  $m$  y el número de antenas receptoras  $N$ . Para este estudio se ha fijado el número total de usuarios, siendo  $L = 2$ . En cuanto al número total de antenas transmisoras  $2 \leq M \leq 6$ . Por lo que, por ejemplo, para  $M = 4$ ,  $m_1 = 2$  y  $m_2 = 2$ , y así sucesivamente. En la primera iteración se ha fijado el número de antenas receptoras  $N = 100$ , en la segunda iteración  $N = 64$  y en la tercera iteración  $N = 36$  y en la cuarta iteración  $N = 20$  antenas respectivamente.

En dicha figura se puede percibir que el defecto de ortogonalidad mejora a medida que aumenta el número de antenas receptoras, a la vez que si se fija el número de antenas receptoras y aumenta el número de antenas emisoras, el defecto de ortogonalidad también aumenta.

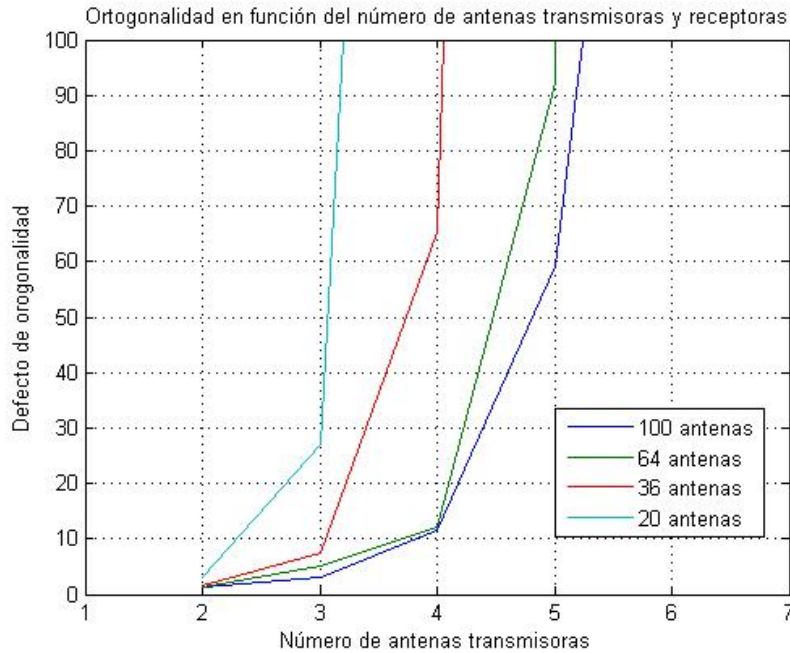


Figura 5.2: Estudio de la ortogonalidad en función del número total de antenas transmisoras y receptoras

Para el último caso, figura 5.3, se ha fijado el número de antenas transmisoras, siendo un total de  $M = 6$  antenas. En cuanto a las antenas receptoras  $20 \leq N \leq 100$ . En este caso se ha ido modificando el número de usuarios siendo  $2 \leq L \leq 6$ . Por lo que, por ejemplo, para  $L = 3$   $m_1 = 2$   $m_2 = 2$   $m_3 = 2$ .

Como se puede comprobar en esta figura, para un número específico de antenas receptoras el defecto de ortogonalidad disminuye a medida que el número de usuarios aumenta. En el caso de un número particular de usuarios se puede observar que el defecto de ortogonalidad disminuye cuanto mayor sea el número de antenas receptoras.

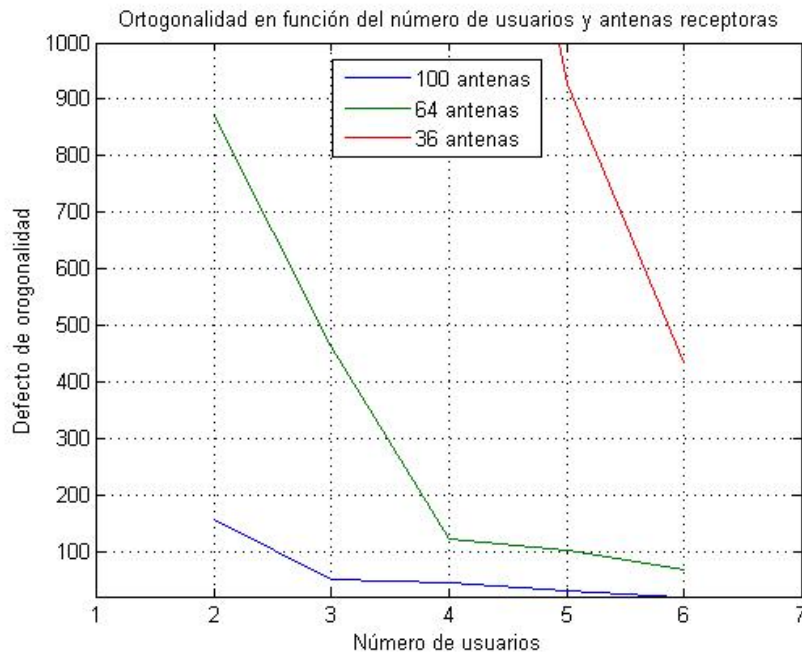


Figura 5.3: Estudio de la ortogonalidad en función del número total de usuarios y de antenas receptoras



## 5.2 Estudio de la capacidad

A continuación se muestra el estudio de la capacidad en función del número de antenas receptoras y de la SNR del sistema. En este caso, para facilitar los cálculos, se ha prefijado el número de antenas transmisoras y el número de usuarios, siendo el número total de antenas transmisoras  $M = 2$  y un total de de usuarios  $L = 2$ , es decir,  $m_1 = 1$  y  $m_2 = 1$ . El número de antenas receptoras es  $4 \leq N \leq 100$ .

Como se puede apreciar en la figura 5.4, a medida que el número de antenas receptoras aumenta la capacidad aumenta. Adicionalmente, si aumenta el valor de SNR la capacidad del sistema también aumenta.

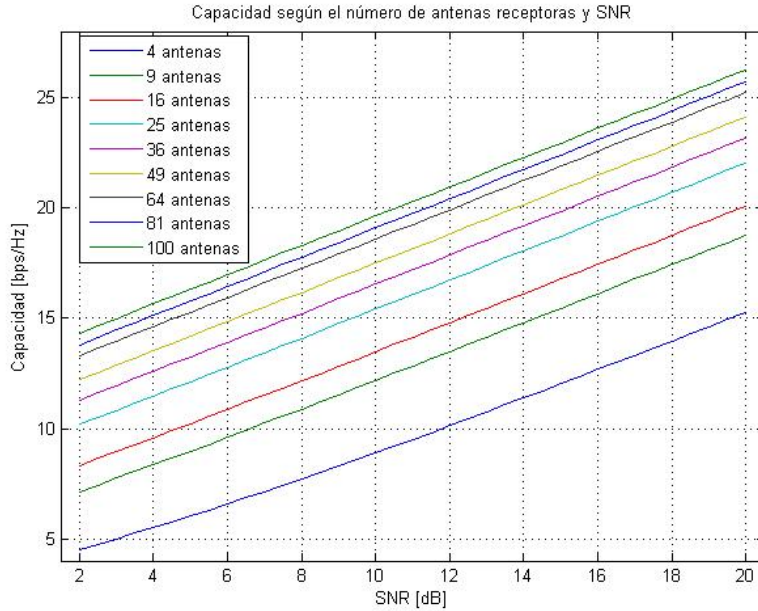


Figura 5.4: Estudio de la capacidad en función del número de antenas receptoras

En la figura 5.5 se muestra el comportamiento de la capacidad en función del número de antenas transmisoras además de la SNR. En esta situación se ha prefijado el número total de usuarios  $L = 2$  y el número de antenas en la estación base (antenas receptoras)  $N = 25$  antenas en total. En cuanto al número de antenas transmisoras, este ha ido creciendo siendo  $2 \leq M \leq 10$ , por lo que por ejemplo para  $M = 6$ ,  $m_1 = 3$  y  $m_2 = 3$ .

Como se puede constatar, la capacidad aumenta también a medida que aumenta el número de antenas transmisoras (a la vez que también aumenta en función de la SNR, a mayor SNR mayor capacidad).

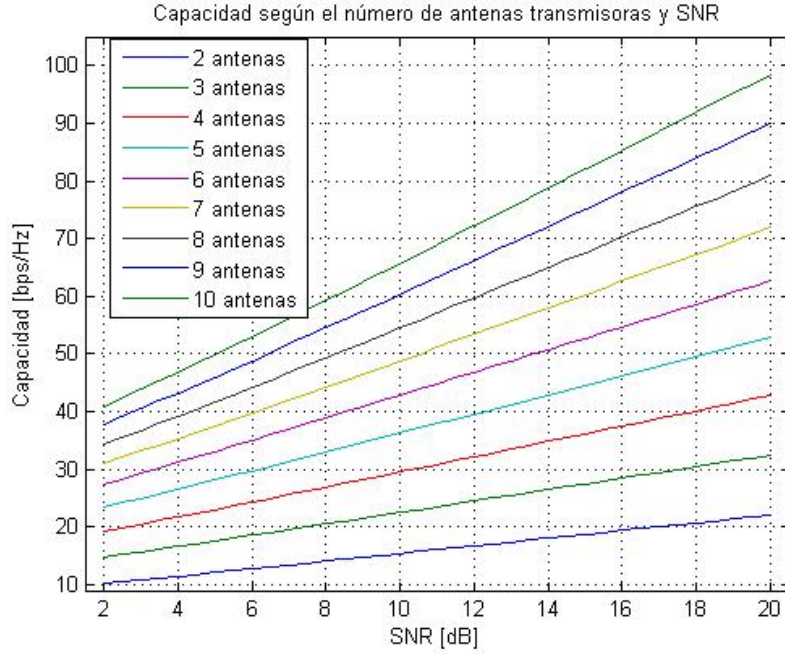


Figura 5.5: Estudio de la capacidad en función del número de antenas transmisoras

En cuanto a la figura 5.6, se muestra la capacidad en función del número de usuarios y, como anteriormente, de la SNR del canal. En este estudio el número de antenas transmisoras es  $M = 10$  y el número de antenas receptoras es de  $N = 25$  en total. Como se puede ver, la diferencia del valor de la capacidad para distintos usuarios no es tan notoria como en las anteriores figuras, pese a que la capacidad incrementa cuando el número de usuarios es mayor.

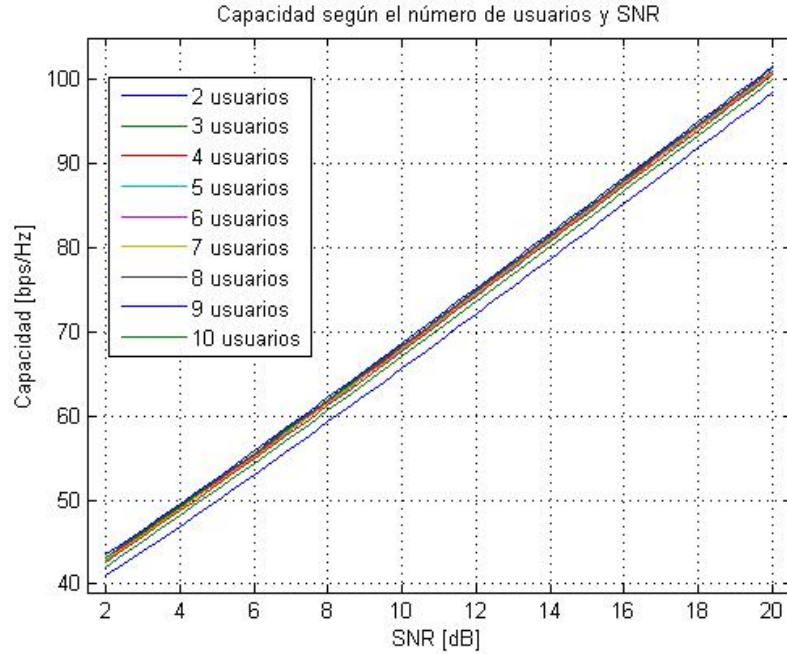


Figura 5.6: Estudio de la capacidad en función del número total de usuarios

### 5.3 Conclusiones de los resultados

En cuanto a la ortogonalidad, podemos comprobar cómo el defecto de ortogonalidad actúa dependiendo del número de usuarios y del número total de antenas, tanto transmisoras como receptoras.

En primera instancia se ha estudiado el comportamiento de la ortogonalidad del canal fijando el número de antenas receptoras. Como podemos comprobar en la figura 5.1 la ortogonalidad es mejor cuando el número de usuarios es mayor, mientras que si aumentamos el número de antenas transmisoras obtenemos un valor menos adecuado de la ortogonalidad. En cuanto a la figura 5.2 se ha estudiado la ortogonalidad fijando el número de usuarios. Como podemos ver, a medida que hay más antenas receptoras el defecto de ortogonalidad es mejor, por el contrario, a medida que tenemos más antenas transmisoras el defecto de ortogonalidad es mayor y por tanto obtenemos un peor resultado. Finalmente, si fijamos el número total de

antenas transmisoras, obtenemos una mejor ortogonalidad a medida que tenemos más usuarios en el sistema, del mismo modo que si tenemos más antenas receptoras, como podemos ver en la figura 5.3.

Como conclusión podemos ver que cuanto menor sea el número de antenas por usuario mejor es la ortogonalidad del canal. También podemos comprobar que incrementando el número de antenas en el receptor mejora la ortogonalidad. Por el contrario, a medida que tenemos más antenas en el emisor, peor resultado obtendremos.

En cuanto a la capacidad del canal, ésta se ha estudiado de la misma manera que el defecto de ortogonalidad, según el número de usuarios y del número de antenas transmisoras y receptoras del sistema de comunicaciones.

Como podemos observar en las figuras 5.4 y 5.5, la capacidad del canal aumenta proporcionalmente con el número de antenas del sistema. En otras palabras, cuantas más antenas en el sistema haya mayor capacidad tendremos. Por otro lado, si nos fijamos en la figura 5.6 podremos comprobar que la capacidad también aumenta a medida que el sistema tiene más usuarios, pese a que el número de antenas transmisoras y receptoras sea el mismo. En este último caso podríamos decir que pese a que la capacidad también aumenta con el número de usuarios, ésta no depende estrictamente del número de usuarios puesto que la diferencia de capacidad entre usuarios no es muy elevada.

## 6 Conclusions

The first part of this project is related to the orthogonality study. This investigation is based on the orthogonality of the channel  $\mathbf{H}$  depending on the number of both transmitting and receiving antennas, as well as the total number of users in the system. This examination is done with the objective of getting a channel matrix  $\mathbf{H}$  as much orthogonal as possible, in other words, our main ambition is obtaining a orthogonality defect close to 1.

As we can see in *Chapter 5.1* the lower the number of antennas per user is, the better the orthogonality of the channel is. Moreover we can see that increasing the number of the antennas in the receiver, improves the orthogonality, but on the other hand, if we have less antennas in the transmitter we get a better result than having too many of them. This is shown in the table bellow.

	Orthogonality defect
Larger number of antennas per user	Worse
Larger number of transmitting antennas	Better
Larger number of receiving antennas	Better

The second part of this project is focused on the study of the channel capacity because one of the improvements of MIMO in the channel was the capacity itself. This improvement is done using a large number of both transmitting and receiving antennas at the same time. This study has been done once the filter in the receptor is applied, in other words, after decoding the signal. As we can check in *Chapter 5.2*, the capacity of the channel increases proportionally with the total number of antennas in the system (both transmitting and receiving).

---

Regarding to the capacity performance depending on the number of users, we can see that the larger the number of users is the higher the capacity is, whereas this growth is not as significant as in the other situations before commented.

On the other hand, the capacity has been studied also according to the SNR of the channel  $\mathbf{H}$ , as we can notice in *Chapter 5.2* the larger the SNR is the bigger the capacity is, as we could expected from the equation 4.8







## APPENDIX



# A Extended abstract

## A.1 Introduction

The exponential growth of the number of mobile devices, and therefore the data demanded by the users, drives to the necessity of looking for a new technology that have to satisfy the huge demand that the users are requiring. The next generation is the fifth generation (5G), this technology will cover the high speed as well as the low latency.

Although the last technologies were driven by the use of mobile Internet for the communication person-to-person, 5G is expected to controll billions of new devices for remote control, telemetry and furthermore the control of many interactions machine-to-machine and person-to-machine as part of Intertet of Things (IoT).

Nowadays, as said before, the necessity of having a higher data speed, and therefore higher capacity, has increased during the past years, thereupon a new technology has to be studied in order to cover those necessities. Multiple Input Multiple Output (MIMO) is one of the technologies that has been selected in order to get those targets in the future, MIMO has improved the wireless communication field offering a large increment of the capacity comparing with the traditional wireless mechanisms. MIMO, as we can deduce from its name, is based on the signal transmission applying multi-paths between both transmitter and receiver, both with several antennas, as we can see in the figure A.1.

In order to achieve those developments we can have some issues. The capacity of the wireless communications is limited due to the interference between antennas and it should not be increased incrementing the transmitted power due to the expense that it would cost. Regarding to the size of the cells, in order to get a better capacity, it should not be less than 300 meters otherwise we could get not enough capacity for the system. Having this in mind, the spectral efficiency can be enhanced with the use of several antennas, both receiving and transmitting (MIMO), allowing large

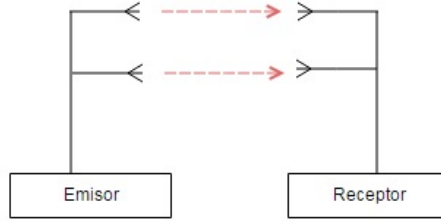


Figure A.1: MIMO.

transmission speed without the increment of the transmitted power and bandwidth assigned.

Respecting to the multi-path transmission, it was seen as an inconvenience regarding the channel fading and its consequences. Recent researchs have demonstrated that multi-path propagation has huge advantages according to the channel capacity as long as the channel is rich enough as well as the use of multiple antennas receiving and transmitting is coherent in both transmitter and receiver.

MIMO allows us to implement: time diversity, frequency diversity, spacial diversity and user diversity.

- **Time diversity.** Here multiples copies of the original signal are sent in different time slots. Those time slots are assigned as long as the temporal space between the copies is higher than the coherence time of the channel.
- **Spacial diversity.** This type of diversity allows to send the same signal from different channels in order to face the losses of the information. When the information is sent in this way, the different signals arrive in the receiver with different attenuations depending on each channel, this ensures that at least one of the copies suffers less interferences than the rest of the signals, therefore the probability of receiving the information sent is higher.
- **Frequency diversity.** MIMO uses Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), in OFDM if the ambiantal dispersion is rich enough different sub-channels can be allocated in the same frequency band, thus the multiplexing doesn't have any additional cost regarding to the frequency band or transmitted power.

Massive MIMO, figure A.2, has made a huge change using a large number of antennas transmitting and receiving, this helps to focus the signal energy on smaller regions, in both sending and receiving. This improvement enhances the efficiency and the throughput, more deeply when the sending of a large number of users is combined at the same time. With the purpose of implement what was menioned before, MIMO was designed to work with FDD although nowadays it can use FDD.

Not only MIMO has been designed to cover all the necessities mentiones above, due to MIMO is implemented with a low energy it leads to a reduction of latency and, therefore, a simplification of the Media Access Control (MAC) as well as the robustness of the interference.

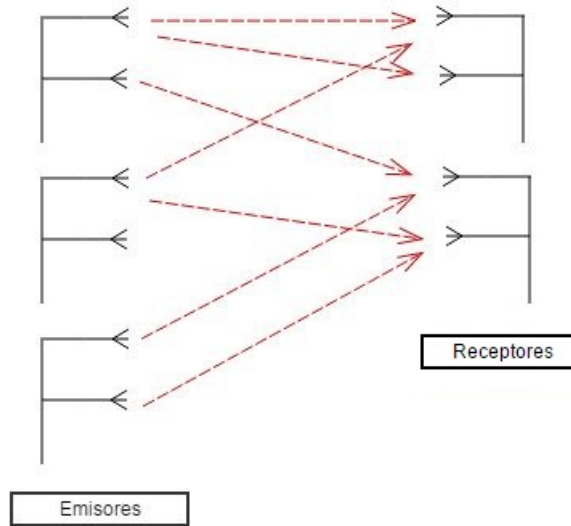


Figure A.2: Massive MIMO.

Having all that in mind, this project is focused on the channel state depending on the number of antennas as well as the number of users. In order to get a certain knowledge related to the channel state we can measure it with two different ways. One can be stochastic knowledge about the channel, here we don't have any information about the channel but it can be modeled as a stochastic function. On the other hand we can get the channel state sending some pilots, here we can obtain the real state.

According to the knowledge of the channel state by sending pilots, we can have some troubles if those pilots are sent in high mobility environments due to these two reasons:

- If we want to have a good performance by sending pilots, they have to be orthogonal between them. This means that the minimum number of pilots that are needed to measure the channel state is proportional to the total number of antennas in the system.
- Each terminal has to calculate as much estimations as antennas has the transmitter.

## A.2 Methodology

This project is focused on the study of massive MIMO channel characteristics, more deeply in the study of the orthogonality and the capacity of the uplink channel with the aim of obtaining a optimum result of those characteristics depending on the number of antennas receiving and transmitting as well as the total number of users in the system.

### A.2.1 Channel modeling

MIMO channel is defined with the matrix  $\mathbf{H}$  and its elements  $h_{nm}$  determine the losses of the channel between the transmitter antenna  $m$  and the receiver antenna  $n$  of the Base Station (BS). The total number of antennas transmitting and receiving in the system is shown by  $M$  and  $N$ , respectively. Assuming that the channel is stationary flat fading with spatial correlation,  $\mathbf{H}$  can be expressed as the equation (A.1), where  $r'_n$  is the relative position of the receiving antenna  $n$  and  $r_m$  is the relative position of the transmitting antenna  $m$ . The directions of the transmitted and received waves are represented with the vectors  $[k_1, k_2, \dots, k_L]$  and  $[k'_1, k'_2, \dots, k'_{L'}]$ , respectively [6].

$$\begin{aligned}
\mathbf{H} = & \begin{bmatrix} e^{jk'_1 r'_1} & e^{jk'_2 r'_1} & \dots & e^{jk'_L r'_1} \\ e^{jk'_1 r'_2} & e^{jk'_2 r'_2} & \dots & e^{jk'_L r'_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{jk'_1 r'_N} & e^{jk'_2 r'_N} & \dots & e^{jk'_L r'_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S(k'_1, k_1) & S(k'_1, k_2) & \dots & S(k'_1, k_L) \\ S(k'_2, k_1) & S(k'_2, k_2) & \dots & S(k'_2, k_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(k'_L, k_1) & S(k'_L, k_2) & \dots & S(k'_L, k_L) \end{bmatrix} \times \\
& \times \begin{bmatrix} e^{-jk_1 r_1} & e^{-jk_2 r_1} & \dots & e^{-jk'_1 r_M} \\ e^{-jk_2 r_1} & e^{-jk_2 r_2} & \dots & e^{-jk_2 r_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jk_L r_1} & e^{-jk_L r_2} & \dots & e^{-jk_L r_M} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_N^\dagger \mathbf{S} \mathbf{B}_M \quad (\text{A.1})
\end{aligned}$$

Where  $B_N$  and  $B_M$  are rectangular matrices which depend on the transmitter and receiver antenna geometry and  $\mathbf{S}$  is a rectangular matrix modeled depending of the angular dispersion.

Assuming that the channel is Gaussian and the dispersions are independent between each other, we can express the channel  $\mathbf{H}$  as the equation (A.2), being  $\Sigma^{\frac{1}{2}}_R$  y  $\Sigma^{\frac{1}{2}}_T$  diagonal matrix which its principal diagonal is modeled according to the correspondent PAS and  $\mathbf{G}$  is a Gaussian complex matrix.

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^\dagger \Sigma^{\frac{1}{2}}_R \mathbf{G} \Sigma^{\frac{1}{2}}_T \mathbf{B}_M \quad (\text{A.2})$$

## A.2.2 Orthogonality

One of the main aspects studied is the orthogonality of the communication channel. Studying the orthogonality of the system is important due to the simplification when decoding the signal.

The message that arrives in the receiver is defined by the formula (A.3), being  $y$  the message arrived in the receiver and  $x$  the message sent by the transmitter.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (\text{A.3})$$

If we want to decode the message, we need to filter the message  $\mathbf{y}$  as shown in the formula (A.4), being  $W_{rx}$  the adaptive filter. Using the orthogonal matrix property:  $\mathbf{A} \times \mathbf{A}' = \mathbf{I}$ , if we have a channel matrix  $\mathbf{H}$  as much orthogonal as possible we can set the value of the filter as  $W_{rx} = \mathbf{H}'$ , thus we could get the real value of the message sent.

$$\mathbf{W}_{rx}\mathbf{y} = \mathbf{W}_{rx}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{W}_{rx}\mathbf{n} \quad (\text{A.4})$$

The orthogonality defect,  $d(\mathbf{H})$ , applied in this project to estimate the orthogonality of the channel is defined as the formula (A.5), being  $h_i$  the  $i$  column of the matrix  $\mathbf{H}$ . The orthogonality defect is always equal or larger than 1,  $d(\mathbf{H}) \geq 1$ , if  $d(\mathbf{H}) = 1$  the matrix channel  $\mathbf{H}$  is orthogonal.

$$d(\mathbf{H}) = \frac{\prod_{i=1}^n \|h_i\|}{\sqrt{\det(\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H})}} \quad (\text{A.5})$$

### A.2.3 Capacity

The other characteristic studied in this project is the capacity of the channel, in this case the capacity has been calculated once the filter has been applied. The capacity of the channel defined the maximum amount of information that can be sent in a reliably way through the communication channel. In fact, the capacity is the mutual information between the input and the output of the probabilistic channel model.

When we want to analyse the capacity of a MIMO system it is necessary to differentiate between two situations depending on the knowledge that we have of the channel and also depending how the channel varies during the transmission. If we have information about the channel state, that situation is called Channel State Information (CSI) and it is divided in two groups, Perfect Channel State Information (CSIT-CSIR) and Channel Distribution Information Tansmitter-Receiver (CDIT-CDIR).



In this project the study of the capacity channel is based on not having any information related to the channel state, this means that neither the transmitter and the receiver has information related to the channel. Based on the Shannon Theorem, we can express the channel capacity as the formula (A.6), where  $\mathbf{I}$  is a identity matrix and its dimension depends on the maximum number of antennas between the receiver and the transmitter.

$$C = E \left( \log_2 \left( \det \left( I + \frac{SNR}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right) \right) \right) \quad (\text{A.6})$$

As mentioned before, the capacity is measured after applying the adaptive filter, then the capacity is calculated as A.7.

$$\mathbf{C} = E \left( \log_2 \left( \det \left( \mathbf{I} + SNR \frac{\mathbf{W}_{rx} \mathbf{H} \mathbf{H}' \mathbf{W}_{rx}'}{\mathbf{W}_{rx} \mathbf{W}_{rx}'} \right) \right) \right) \quad (\text{A.7})$$

### A.3 Results

The aim of this project is the study of the optimum value of the orthogonality and the capacity of a massive MIMO channel depending on the total number of users in the system as well as the total number of antennas, both transmitting and receiving.

In this part different orthogonality and capacity simulations are shown in order to notice the different performances according to the number of antennas and users.

Massive MIMO is based on a large number of users and antennas in the system. This study is based on an uplink connection. According to the receiver (BS) the number of antennas is defined by  $N$ . According to the transmitter, the total number of users is defined by  $L$ ,  $m_i$  shows the number of antennas of the user  $i$  and the total number of transmitting antennas is  $M$  which is defined by:  $\sum_{i=1}^L m_i = M$ .

According to the positions of the antennas in the space, the vertical and horizontal space between antennas are  $\frac{\lambda}{2}$ , being  $\lambda$  the wave length. The azimuth of the antennas is  $\frac{\lambda}{2}$ . Regarding to the distance between users, they are equispaced between them.

### A.3.1 Orthogonality defect

The simulation A.3 is made with the aim of testing the orthogonality defect behaviour depending on the total number of users in the system. In this case, the total number of receiving antennas is fixed as  $N = 100$ . In the first iteration the number of transmitting antennas is  $M = 4$ , according to the number of users it is  $2 \leq L \leq 4$ , thus for example, if  $M = 4$  and  $L = 2$  the total number of antennas per user is  $m_1 = 2$  and  $m_2 = 2$ . In the second iteration the total number of transmitting antennas is  $M = 5$  and the number of users is  $2 \leq L \leq 5$ . In the third iteration  $M = 6$  and  $2 \leq L \leq 6$ . In the last iteration  $M = 7$  and  $2 \leq L \leq 7$ .

As we can see, the orthogonality defect is larger when the number of transmitting antennas per user is higher. On the other hand, the orthogonality defect is smaller when the number of users is larger.

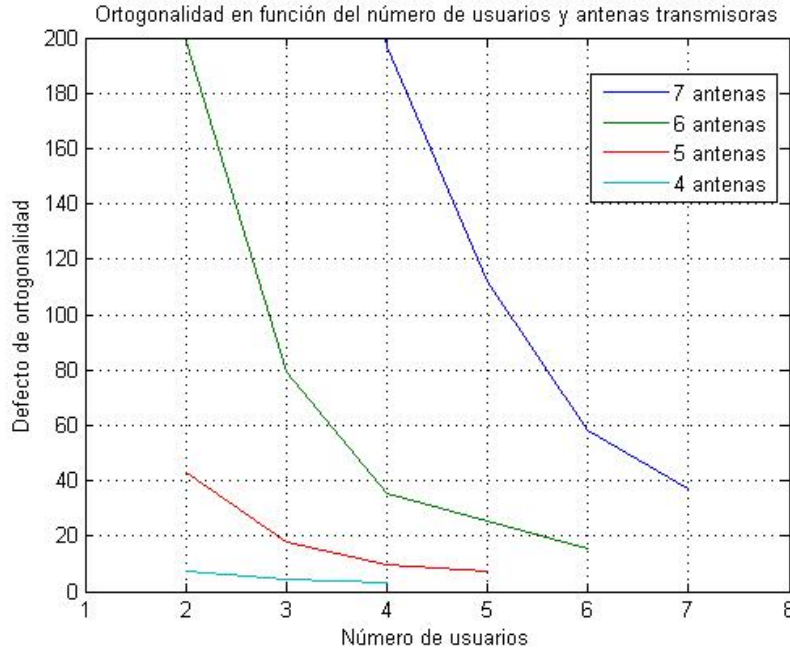


Figure A.3: Orthogonality defect depending on the total number of users and transmitting antennas

Below, in the figure A.4 the orthogonality defect is shown depending on the total number of antennas both transmitting per user ( $m$ ) and receiving  $N$ . Here the number of users is set as  $L = 2$ , to simplify the calculations. Regarding to the number of antennas transmitting it is  $2 \leq M \leq 6$ . Thus, for example, if  $M = 4$ ,  $m_1 = 2$  y  $m_2 = 2$ , and so on. In the first iteration the total number of receiving antennas is  $N = 100$ , in the second  $N = 64$ , in the third  $N = 36$  and in the last iteration  $N = 20$  antennas respectively.

In this figure we can perceive that the orthogonality defect is higher when the number of transmitting antennas is larger, whereas the orthogonality defect is lower when the number of receiving antennas is higher.

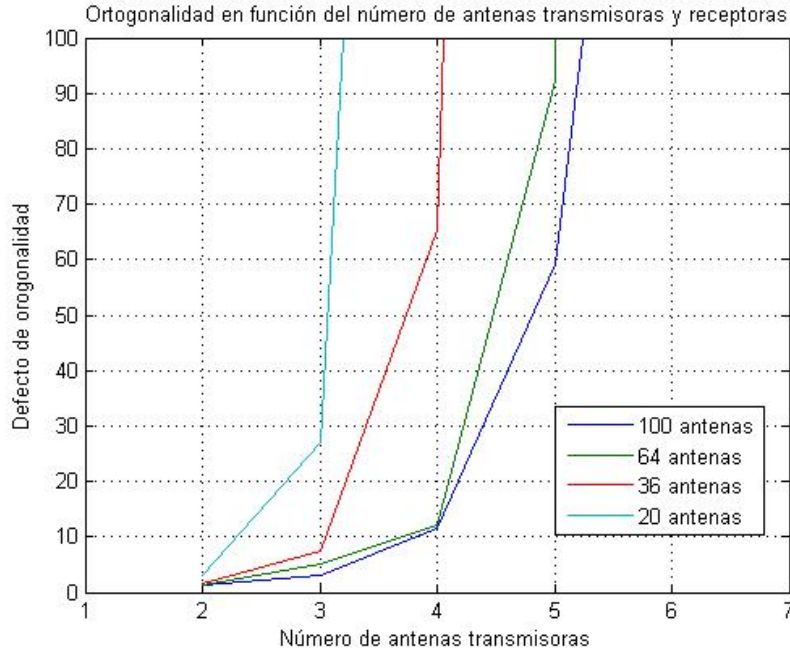


Figure A.4: Orthogonality defect according to the total number of antennas, both receiving and transmitting

Finally, to make the simulation of the figure A.5 the number of transmitting antennas is fixed as  $M = 6$  antennas. Regarding to the number of receiving antennas it is  $20 \leq N \leq 100$ . In this case the number of users is changing as  $2 \leq L \leq 6$ . Thus, for example if  $L = 3$ ,  $m_1 = 2$   $m_2 = 2$   $m_3 = 2$ .

As we can observe, the orthogonality defect is higher when the number of receiving antennas is larger, although the orthogonality is smaller when the number of users

is larger.

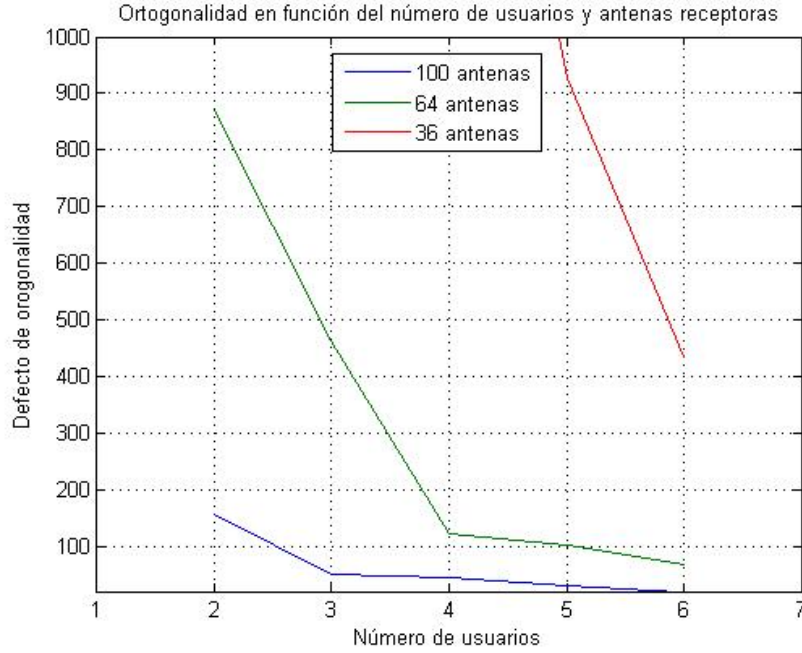


Figure A.5: Orthogonality defect depending on the total number of users and receiving antennas

### A.3.2 Capacity

In the first simulation, figure A.6, the capacity is calculated in order to see the differences when the number of receiving antennas is changing. To simplify the measurement, the total number of users as well as the total number of transmitting antennas is  $M = 2$ , then each user has 1 antenna,  $m_1 = 1$  and  $m_2 = 1$ . According to the total number of receiving antennas it is  $4 \leq N \leq 100$ . As we can see the capacity of the system is higher when the number of receiving antennas is larger.

In the next figure A.7 we can see the performance of the capacity according to the total number of transmitting antennas. In this situation the total number of users is  $L = 2$  and the total number of antennas in the base station is  $N = 25$ . According to the number of transmitting antennas, it varies as  $2 \leq M \leq 10$ . Thus, for example, if  $M = 6$ ,  $m_1 = 3$  and  $m_2 = 3$ . As we can observe, the capacity is higher when the number of transmitting antennas is higher as well.

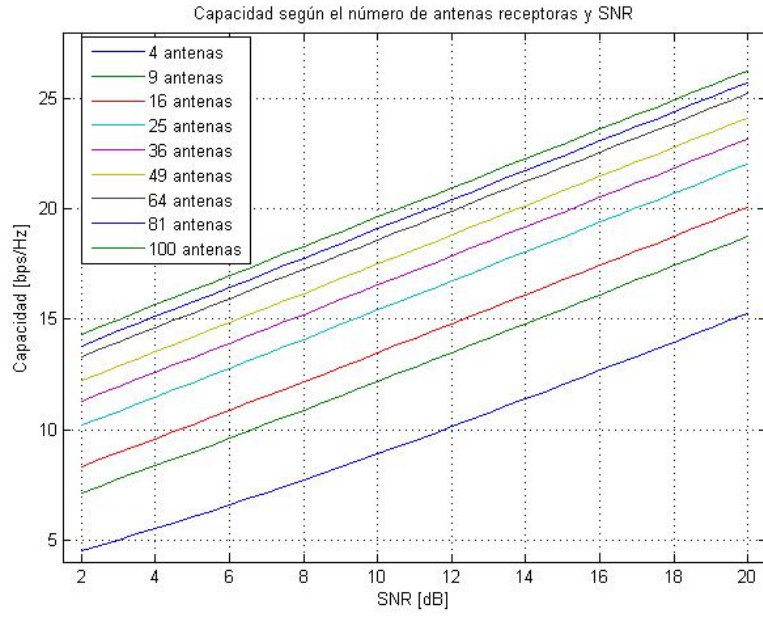


Figure A.6: Capacity depending on the total number of receiving antennas

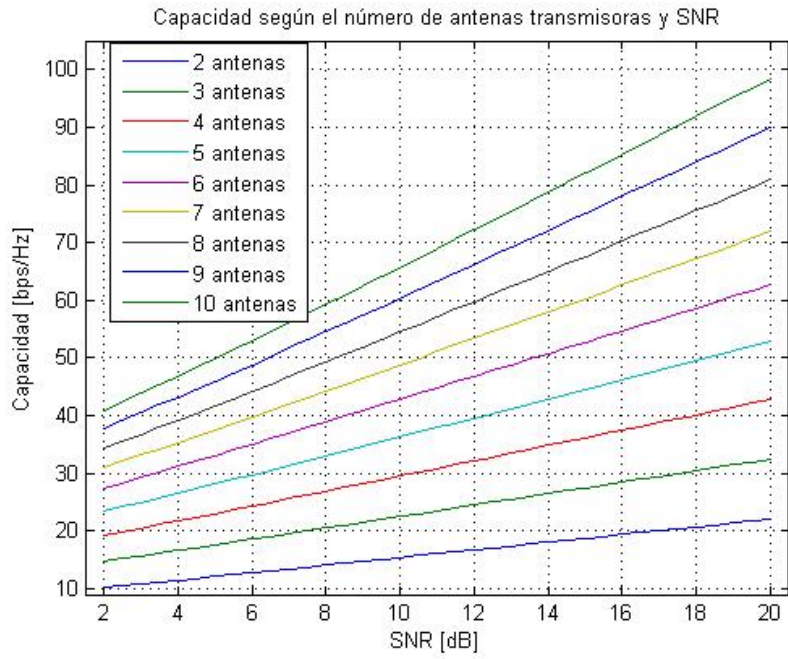


Figure A.7: Capacity depending on the total number of transmitting antennas

In the las figure A.8, the capacity is measured according to the total number of users. For this simulation the total number of transmitting antennas is  $M = 10$  and the total number of receiving antennas is  $N = 25$ . As we can check, the capacity also grows when the total number of users in the system is higher, although this change is not as noticeable as in the other figures.

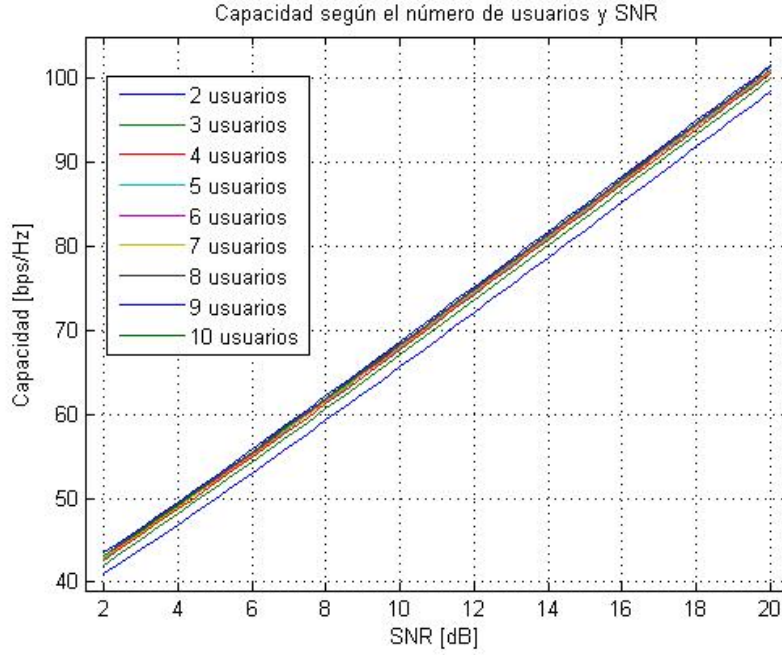


Figure A.8: Capacity according to the total number of users in the system

## A.4 Conclusions

According to the orthogonality study we can check how the orthogonality defect performs depending on the number of users and the total amount of transmitting and receiving antennas.

From the Fig. A.3 we can see that, by fixing the number of receptors, the orthogonality defect is better when the total number of transmitting antennas per user is decreasing. Referring to the Fig. A.4 we can check that by fixing the number of users in the system, the orthogonality of the channel is better when we have more antennas in the receiver, whereas if we focus on a specific number of receiver antennas we can see that the orthogonality is worse when the number of transmitting

antennas is higher. Finally, by fixing the total number of transmitting antennas, we get a better performance according to the orthogonality of the channel when the number of users is higher and when we have more receiving antennas, as it can be seen in Fig. A.5.

To conclude, the lower the number of antennas per users in the system is, the better the orthogonality of the channel is. Moreover we can see that increasing the number of the antennas in the receiver, improves the orthogonality, but on the other hand, if we have less antennas in the transmitter we get a better result than having too many of them; as represented in the table below.

	Orthogonality defect
Larger the number of antennas per users	Worse
Larger number of transmitting antennas	Better
Larger number of receiving antennas	Better

The capacity of the channel has been studied depending on the number of users as well as receiving and transmitting antennas. As we can see in the Fig. A.6, the capacity of the channel is larger when the number of receiving antennas is higher. On the other hand, if we fix the number of receiving antennas we can see that the capacity increases when the number of transmitting antennas is higher ,as shown in Fig. A.7. Based on Fig. A.8, It should be noted that although the capacity of the channel is larger when the number of users is increasing, a change in the number of users does not have the same impact on the capacity of the channel as in the previous simulations shown in Fig. A.6 and A.7.





## B Entorno socio-económico, planificación y presupuesto

En este apéndice se plantea el entorno socio-económico del proyecto MIMO así como el presupuesto requerido para la realización de este proyecto.

### B.1 Entorno socio-económico

En los últimos años la evolución social necesita de una nueva generación en cuanto a comunicación e información se refiere, 5G. Esta nueva generación requiere una tecnología con una alta velocidad, rendimiento y capacidad con una baja latencia a la hora de hacer posible la comunicación. MIMO masivo es la tecnología pensada para esta forma de comunicación. La banda ancha móvil es el punto clave de 5G, ésta va más allá del uso básico de Internet, haciendo hincapié en el desarrollo de aplicaciones de trabajo y medios de comunicación, como por ejemplo servicios de *streaming*, desarrollo de servicios de entretenimiento interactivo en la nube o aumentos de la realidad, como por ejemplo vídeos 3D.

En cuanto al campo económico, la tecnología 5G ha recibido el respaldo de entidades públicas y privadas las cuales aceptaron un acuerdo multilateral basado en los programas Advanced 5G Network Infrastructure for Future Internet Public-Private Partnership(5G PPP) y European Technology Platform for Communications Networks and Services (ETP Networld 2020), impulsados por la Comisión Europea dentro del programa Horizonte 2020.

## B.2 Planificación

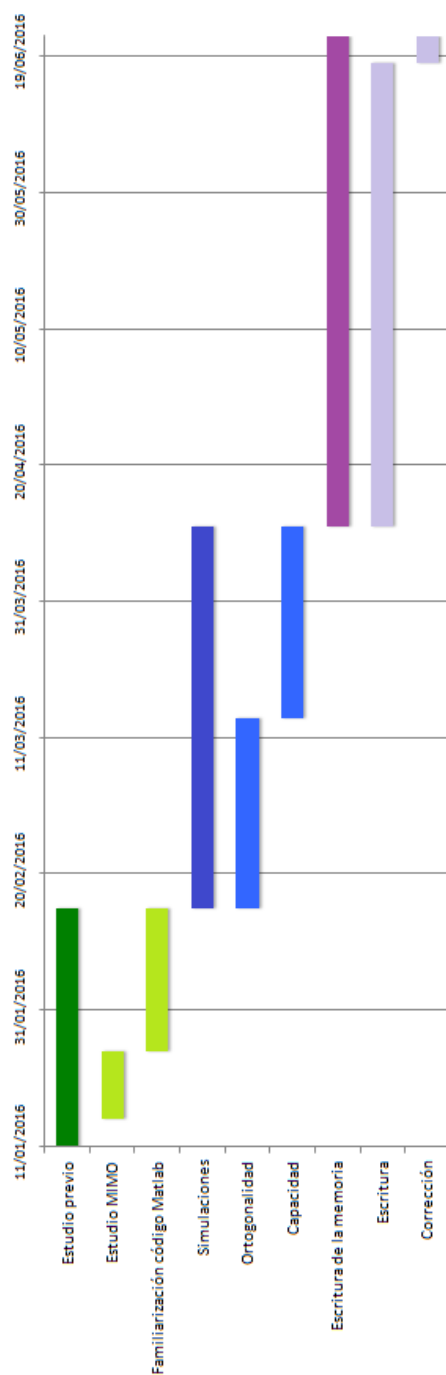


Figure B.1: Diagrama de Gantt

### B.3 Presupuesto

A continuación se muestra el presupuesto necesario para la realización de este proyecto, teniendo en cuenta que el ordenador utilizado es un *Asus i7* y la licencia de Matlab necesaria es la más básica dado que no han sido utilizados ningún *toolbox*.

Ítem	Coste
Ordenador	800 €
Licencia MATLAB y Simulink para estudiantes	69 €
<b>TOTAL</b>	<b>869 €</b>

en cuanto a las horas invertidas en el proyecto, suponiendo un coste de un ingeniero junior de 7 €/hora y un coste de 40 €/hora de un ingeniero senior supondría un coste total por horas realizadas de:

Personal	€/hora	Horas invertidas	Coste
Alumno	7	400	2800€
Supervisor del proyecto	40	90	3600€
<b>TOTAL</b>			<b>6400€</b>

Por lo tanto el proyecto supondría un coste total de 7269 €.



# Referencias

- [1] Clear Doubts (2011) Available at: <http://www.cleardoubts.com/technology/what-is-1g-or-first-generation-of-wireless-telecommunication-technology/>
- [2] Museo del celular (2010) Available at: <http://micolecciondecelulares.blogspot.com.es/2008/05/estndares-de-telefonamvil.html>
- [3] Hartman, D. 'The Advantages of 1G Mobile Phones', eHow, Available at: [http://www.ehow.com/list\\_6100741\\_advantages-1g-mobile-phones.html](http://www.ehow.com/list_6100741_advantages-1g-mobile-phones.html)
- [4] Blurtit and Normanton, R. What are disadvantages of 1g technology?, Available at: <http://technology.blurtit.com/3166885/what-are-disadvantages-of-1g-technology>
- [5] Communication systems/analog vs. Digital - Wikibooks, open books for an open world, Available at: [https://en.wikibooks.org/wiki/Communication\\_Systems/Analog\\_vs.\\_Digital](https://en.wikibooks.org/wiki/Communication_Systems/Analog_vs._Digital)
- [6] Kumar, A. and Verma, V. (2014) 'International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering', Study on Improving Coverage Area by Cell Splitting and Cell Sectoring Method in Cellular System, 4(2), pp. 813–820.
- [7] Purkayastha, B. B., and Sarma, K. K. (2015). A digital phase locked loop based signal and symbol recovery system for wireless channel. Springer India.
- [8] A review of the disadvantages of 2G technologies (2010) Available at: <http://www.2gprod.com/a-review-of-the.html>
- [9] Holma, H., Kristensson, M., Salonen, J., and Toskala, A. (2004). UMTS services and applications. WCDMA for UMTS: Radio access for third generation mobile communications 3rd ed, 11-46.

- [10] Reserved, A.-L.A.R. (2012) 400 MHz Broadband spectrum for public safety (January 2015) (PDF/751.54 KB). Available at: <https://www.alcatel-lucent.com/public-safety/lte>
- [11] Dex Media (2014) Benefits of 4g wireless. Available at: <https://enlightenme.com/4g-wireless/>
- [12] Luther, E. (2015) 5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality. Available at: <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/>
- [13] 5G multiple access schemes Available at: <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/5g-mobile-cellular/multiple-access-schemes.php>
- [14] Brydon, A. (2014) Unwired insight. Available at: <http://www.unwiredinsight.com/2014/5g-mobile-network-features>
- [15] Rodríguez, P. (2016) ¿Qué bandas de frecuencia usará 5G? Ésta es la propuesta de Ofcom. Available at: <http://www.xatakamovil.com/conectividad/que-bandas-de-frecuencia-usara-5g-esta-es-la-propuesta-de-ofcom>
- [16] Inside 5G (2016) Available at: <http://inside5g.com/researchers-achieve-world-record-spectral-efficiency-with-massive-mimo/>
- [17] Allevén, M. (2016) 'Bristol, Lund claim record in 5G spectral efficiency', FierceWirelessTech.
- [18] Mathuranathan (2014) MIMO – diversity and spatial multiplexing. Available at: <http://www.gaussianwaves.com/2014/08/mimo-diversity-and-spatial-multiplexing/>
- [19] Poole, I. Radio-Electronics. Available at: <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/mimo/formats-iso-simo-miso-mimo.php>
- [20] ZHENG, Kan; OU, Suling; YIN, Xuefeng. Massive MIMO channel models: A survey. International Journal of Antennas and Propagation, 2014, vol. 2014.

- [21] Teoría de la Comunicación - Capítulo 5 - Límites fundamentales en los sistemas de comunicaciones digitales, Available at: [http://www.tsc.uc3m.es/~mlazaro/Docencia/TC-Web/c5capacidad\\_de\\_canal.html](http://www.tsc.uc3m.es/~mlazaro/Docencia/TC-Web/c5capacidad_de_canal.html)
- [22] Tulino, A., Lozano, A., and Verdú, S. (2004, August). MIMO capacity with channel state information at the transmitter. In *Spread Spectrum Techniques and Applications, 2004 IEEE Eighth International Symposium on* (pp. 22-26). IEEE.
- [23] Sánchez-Fernández, M., Zazo, S., and Valenzuela, R. (2007). Performance comparison between beamforming and spatial multiplexing for the downlink in wireless cellular systems. *IEEE transactions on wireless communications*, 6(7), 2427-2431.
- [24] Sanchez-Fernandez, M., Rajo-Iglesias, E., Quevedo-Teruel, O., and Pablo-Gonzalez, M. L. (2008). Spectral efficiency in MIMO systems using space and pattern diversities under compactness constraints. *IEEE transactions on vehicular technology*, 57(3), 1637-1645.